

УДК 621.577

**Сетюков Віталій Борисович**, провідний спеціаліст, ВАТ «КАДМ», м. Харків, Україна. вул. Чичібабіна, 9, під.11, м. Харків, Україна, 61022. тел. (057) 705-48-87.  
E-mail: [firmakadm@rambler.ru](mailto:firmakadm@rambler.ru)

### АКУМУЛЮВАННЯ ЕНЕРГІЇ В ПРИМІЩЕННЯХ З НУЛЬОВИМ ЕНЕРГОСПОЖИВАННЯМ

*Запропонована і розрахунково підтверджена доцільність і еколого – енергетична ефективність використання інерційного накопичувача енергії в будинках з нульовим енергоспоживанням.*

**Ключові слова:** інерційний накопичувач енергії, дім нульового енергоспоживання.

**Сетюков Виталий Борисович**, ведущий специалист, ООО «КАДМ», г. Харьков, Украина. ул. Чичибабина, 9, под.11, м. Харьков, Украина, 61022. тел. (057) 705-48-87. E-mail: [firmakadm@rambler.ru](mailto:firmakadm@rambler.ru)

### АККУМУЛИРОВАНИЕ ЭНЕРГИИ В ДОМАХ С НУЛЕВЫМ ЭНЕРГОПОТРЕБЛЕНИЕМ

*Предложена и расчетно подтверждена целесообразность и эколого – энергетическая эффективность использования инерционного накопителя энергии в домах с нулевым энергопотреблением.*

**Ключевые слова:** инерционный накопитель энергии, дом нулевого энергопотребления.

**Setiukov Vitaliy Borisovich**, leading specialist, CADM ООО, Kharkov, Ukraine. Str. Chichibabina, 9, entr.11, Kharkov, Ukraine, 61022. tel. (057) 705-48-87. E-mail: [firmakadm@rambler.ru](mailto:firmakadm@rambler.ru)

### ACCUMULATION OF ENERGY IN HOUSES WITH A ZERO ENERGY CONSUMPTION

*Offered and a calculation is confirmed expedience and environmental is power efficiency of the use of inertial store of energy in houses with a zero energy consumption.*

**Keywords:** inertial store of energy, house of a zero energy consumption.

#### Введение

Известно, что общей особенностью практически всех видов возобновляемой энергии (солнце, ветер, энергия приливов) является существенная изменчивость их потенциала во времени в районах непосредственного размещения потребителей. В ряде случаев амплитуда указанного потенциала изменяется от нуля до некоторого максимума с возможными промежуточными провалами энергетического уровня.

Не останавливаясь на достаточно широкой проблематике аккумулирования энергии в самых разнообразных сферах генерирования и потребления энергии, рассмотрим лишь возможные варианты и анализ этих вариантов применительно к проблеме создания домов с нулевым внешним энергопотреблением (ДНЭП).

В нашей статье [1] с ссылкой на достаточно обширную информацию [2–8], опубликованную в сравнительно недавнее время, еще раз показана безусловная перспективность создания ДНЭП и актуальность научных разработок в этой области, подтвержденных в основном примерами зарубежных реализаций соответствующих проектов.

Вместе с тем, климатические условия большинства районов Украины, с одной стороны, и постоянно обостряющаяся проблема энергоснабжения, – с другой, позволяют считать, что в общегосударственной программе энергосбережения нашей страны, направление, связанное с созданием ДНЭП, возможно более актуально, чем в энергетически более благополучных странах, активно реализующих эти программы.

Здесь следует отметить еще одну общую тенденцию формирования энергетики в высокоразвитых странах, когда требования экологичности инженерных решений являются более жесткими, а в ряде случаев и определяющими, сравнительно с требованиями, к примеру, снижения стоимости 1 кВт установленной мощности оборудования. При самом разнообразном схемно – когенерационном решении относительно энергетической структуры ДНЭП, использование возобновляемых источников энергии различной физической природы как основы функционирования таких зданий, сопряжена с необходимостью решения задач аккумулирования энергии.

**Целью работы** является подтверждение целесообразности применительно к ДНЭП использования инерционных накопителей энергии (ИНЭ).

#### Основная часть

В настоящее время известен ряд технических решений в части аккумуляторов энергии [9], используемых в соответствующих энерготехнологических объектах.

Один из наиболее «древних» методов осуществляется с помощью гидроаккумулирующих станций (ГАС). В простейшей реализации – это два больших резервуара, разнесенных по высоте. При

избытке энергии вода закачивается в верхний резервуар, а при дефиците потенциала – сливается в нижний через гидротурбину с электрогенератором. Опыт эксплуатации ГАС показал, что минимальный перепад уровней между верхним и нижним резервуаром, обеспечивающим рациональность использования этого вида аккумулирования энергии, составляет порядка 100 м. В ряде случаев для функционирования ГАС требуется искусственное водохранилище, расположенное на высоте, или в виде подземного объема воды. К числу факторов, осложняющих либо определяющих необходимость альтернативных решений, относится низкий КПД гидроподъема и выработки электрической энергии.

Известно аккумулирование энергии с помощью сжатого воздуха Compressed Air Energy Storage (CAES). Используя непииковую нагрузку, CAES создает запас сжатого воздуха, хранящегося в резервуарах либо в пещерах, энергия которого в соответствующий период используется в воздушном турбогенераторе. В 1991 г. В штате Алабама (США) электрическим обществом был построен пневмоаккумулятор мощностью 110 МВт. В настоящее время американская фирма EPRI выпускает пневмоаккумуляторы мощностью от 5 до 350 МВт.

Широкое распространение в самых различных сферах генерирования и потребления энергии получили химические аккумуляторы или т.н. гальванические элементы. Как правило, химические аккумуляторы эксплуатируются в группе из однотипных батарей (многоразовых гальванических элементов) соединенных электрически и конструктивно. Проблема улучшения энергомассовых характеристик этого типа аккумуляторов является для многих сфер производства, быта и транспорта одной из наиболее перспективных.

В последние десятилетия актуальной задачей в области создания высокоэффективных средств аккумулирования энергии является решение проблемы т. н. высокотемпературной сверхпроводимости. Принцип действия этого аккумулятора построен на известном эффекте уменьшения омического сопротивления проводника по мере снижения его температуры. Преимущество этой системы – компактность, энергоемкость, способность хранить энергию без потерь на протяжении сколь угодно долгого времени пока в проводнике будет сохраняться состояние сверхпроводимости. В настоящее время производятся сверхпроводники, работающие при весьма низких температурах  $T_c$  перехода в сверхпроводящее состояние. В зависимости от электрофизических свойств материалов величина  $T_c$  составляет от долей градусов Кельвина до 21 К [9], что, естественно, требует дополнительных затрат энергии на криогенное обеспечение сверхпроводимости. В настоящее время во всем мире и, в частности, в институте низких температур АН Украины (г. Харьков) ведутся успешные работы по созданию материалов с высокотемпературной сверхпроводимостью. Речь идет о температурах от уровня окружающей среды до 200°C.

В качестве технологии хранения энергии в ряде случаев используются т.н. конденсаторные аккумуляторы – системы, накапливающие электрические заряды, состоящие из двух и более подвижных или неподвижных электродов (обкладок), разделенных диэлектриком (бумагой, слюдой, воздухом). Впервые т. н. «лейденскую банку» изготовили в середине XVIII века в голландском городе Лейдене. Одно из несомненных достоинств конденсаторов – способность выдать всю или часть запасенной энергии в самое короткое время.

К недостаткам этого вида аккумулятора относится опасность непредвиденного пробоя, который при мгновенном выделении всей запасенной энергии может быть сравним со взрывом. Считается, [10], что в перспективе конденсаторные батареи могут настолько повысить свои энергомассовые характеристики, что станут вполне конкурентноспособными сравнительно с любыми аккумуляторами и даже превзойти их. В настоящее время для мощностей мал-масштаба (< 250 KW) конденсатор является одним из перспективных вариантов.

В рамках Инновационного форума Росатома предлагался проект теплового аккумулятора для блока АЭС с ВВЭР–1000. Предложена схема отбора пара турбины на нагрев аккумулирующего вещества в период низкого энергопотребления и производства дополнительного пара на турбину, за счет саккумулированной теплоты в период пиковых нагрузок. Тепловые аккумуляторы уже использовались на спускаемых аппаратах АМС «Венера – 9» и других автоматических зондах для охлаждения аппаратуры.

В 1994 г. физики В. П. Яковлев и В. И. Андрианов на основе изучения природы шаровой молнии, подали заявку на «Способ аккумуляции энергии в шаровом плазмоне и плазменном аккумуляторе» номинальной энергией 23 кВт·ч с габаритами 50 x 50 x 80 см и массой 50 кг.

Аккумулирование энергии с помощью высокооборотного махового колеса (маховика) восходит к 1986 г., когда российский изобретатель инженер З. Шуберский опубликовал идею использования мощных маховиков на железнодорожном транспорте в виде т.н. «маховоза». В настоящее время

маховики используются с достаточно широким спектром применения – от микромаховиков в часовом производстве до супермаховиковых кластерных систем мощностью, порядка 500 мВт для сглаживания пиковых нагрузок в работе АЭС, что (помимо прочих положительных аспектов) существенно продлевает срок службы энергогенерирующих ТВЭлов.

Американская компания Beacon Power, основанная в 1997 году, создала большой параметрический ряд тяжелых стационарных супермаховиков, предназначенных для включения в промышленные электросети. Beacon Power сообщает [9], что потери энергии, закаченной в маховиковый аккумулятор составляют не более 2 %, что заметно лучше, чем у систем хранения энергии, основанных на иных принципах. Стоимость аккумуляторов оценивается на уровне 400 – 500 \$/кВт установленной мощности [9], при сроке монтажа 3–4 месяца.

В табл. 1 по данным [9] приведено сравнение показателей плотности аккумулируемой энергии

$$W = N\tau / M, \quad (1)$$

где  $N$  – мощность источника энергии, кВт;  $\tau$  – время передачи накопленной энергии в маховике, час;  $M$  – масса маховика, кг.

Таблица 1

Плотность аккумулированной энергии

Устройство	$W$ , кВт·ч/кг	КПД, %	$W^*$ , кВт·ч/кг
Водород	38,0	5–60	20–23
Бензин	13–14	25–30	3,25–4,2
Свинцово-кислотный аккумулятор	0,025–0,04	96–98	0,02–0,039
Гидроемкость	0,0003	64	0,0002
Сжатый воздух	2 (на 1 м <sup>3</sup> )	30–40	0,6–0,8
Стальной маховик	0,05	96–98	0,049
Маховик из углерод. волокна	0,215–0,5	96–98	0,21–0,49
Маховик из кварцевого стекла	0,9	96–98	0,88
Кольцевой маховик	1,4–4,17	96–98	1,36–4,0

Здесь  $W^*$  – показатель с учетом КПД аккумулятора.

С целью обеспечения прочности маховика при высоких числах оборотов, его выполняют либо из навитых металлических лент, либо навитых тросов. В настоящее время на базе нанотехнологий разработано углеродистое волокно, прочность которого на несколько порядков превышает прочность стали [11, 12]. Так называемые супермаховики, выполненные из тонкого волокна имеют показатель  $W$  до 50 кВт·ч/кг, что превышает показатели водорода, как самого энергоемкого на сегодняшний день. Использование вакуумированного герметичного корпуса для маховика и размещенного на его валу обращенного электрического мотор – генератора, а также использование гидростатических подшипников делает такой вид аккумулятора одним из самых перспективных. Это обстоятельство побудило оценить целесообразность использования инерционных аккумуляторов энергии (ИАЭ) в общей энергетической схеме ДНЭП. Из доступных источников информации прецеденты такого рода автору не известны.

Для определения режимно– геометрических характеристик маховика прежде всего необходимо установить его энергетическую нагрузку. Предварительный анализ показал, что принятие технического решения о характеристиках ИНЭ (или любого другого аккумулятора) требует достаточно обширной и многофакторной исходной информации, включающей:

- среднестатистический график потребления энергии;
- схемно- структурное решение относительно энергетического комплекса ДНЭП;
- при наличии нескольких блоков с различными ВИЭ (солнце, грунт, ветер) необходима программа их энергетического взаимодействия в соответствии с суточными графиками, энергопотребления, ДНЭП и изменения потенциала ВИЭ.

В соответствии с достаточно подробным исследованием, выполненным в работе [13], оптимальный диапазон энергопотребления, востребованный на рынке малоэтажного строительства составляет: – по электрической энергии – до 5 кВт; – по теплоснабжению – до 65 кВт.

На основе статистического анализа потребностей в энергоснабжении определено [13], что для современных малоэтажных индивидуальных домов соотношение тепловой и электрической энергии при реальном среднесуточном потреблении семьи составляет 13:1. Для 2–3 квартирного жилого дома электропотребление может возрасти до 10–15 кВт, а при техническом энергопотреблении (фермерское хозяйство) – до 30 кВт.

Для упрощения задачи примем вышеприведенные данные в качестве исходных, а схемное

решение когенерационного микроэнергокомплекса (в качестве одного из многих возможных вариантов) прием таким, какой был исследован в работе [13]. Основными блоками в [13] являются – вакуумный солнечный коллектор, где вода превращается в насыщенный пар, питающий паровую турбину с электрогенератором. Отработавший в турбине пар конденсируется в конденсаторе за счет отбора теплоты в систему отопления и горячего водоснабжения. В схеме предусмотрены тепловой и электрический аккумуляторы, работающие в ночное время.

Использование гальванических батарей, аккумулирующих избыток электрической энергии в дневное время, является, с экологической точки зрения, не лучшим решением не только в период эксплуатации в жилом доме, но также в периоды производства и утилизации этих батарей, отработавших свой ресурс. Поэтому рассмотрим вариант использования ИНЭ в условиях реально обследованного в [13] дома как альтернативы гальваническим элементам. По данным [13] наиболее часто потребляемое количество электроэнергии в месяц составляло от 200 кВтч до 500 кВтч. Сопоставление приведенных графиков «активности» солнечного коллектора, поставляющего пар в турбину и графика изменения электропотребления в течении суток позволило установить, что аккумулятор электроэнергии должен иметь минимальную емкость порядка 6,4 кВтч и максимальную емкость – до 12,8 кВтч.

В соответствии с данными таблицы 1 и диапазоном суточного потребления энергии от 6,4 кВтч до 12,8 кВтч необходимая масса маховика по формуле (1) составляет:

– для стального маховика – от 128 до 256 кг; – для маховика из углеродистого волокна – от 12,8 до 59,5 кг; – для маховика из кварцевого стекла – от 7,1 до 14,2 кг.

По одной из методик расчета маховика [14], запасенная в нем энергия Э, кВтч определяется как

$$\mathcal{E} = \frac{I}{2(\omega_1^2 - \omega_2^2) \cdot 3600}, \quad (2)$$

где I – момент инерции, кг/м<sup>2</sup>,  $\omega_1$  и  $\omega_2$  – максимальная и минимальная угловые скорости вращения маховика, рад./с. Момент инерции определяется по формуле

$$I = \frac{M}{2(R^2 + r^2)}, \quad (3)$$

где M – масса маховика, кг; R и r – внешний и внутренний радиусы маховика, м

$$M = 0,5 [\pi (R^2 - r^2) h \cdot \rho], \quad (4)$$

где h – толщина маховика, м,  $\rho$  – плотность материала маховика, кг/м<sup>3</sup>

Из (2) – (4) следует, что при известной массе M для определения размеров маховика R, r и h необходимо задать скорости  $\omega_1$  и  $\omega_2$  или максимальную и минимальную частоту вращения, n 1/с.

Если принять, что радиус r – это фактически радиус вала, на котором размещен маховик, то этот размер легко определяется из известных соотношений [15], определяющих сопротивление вала, на скручивание, при заданной передаваемой мощности и крутящем моменте.

Из опыта эксплуатации инерционных накопителей энергии [10], примем максимальную частоту вращения маховика  $n_1=3000$  об/мин ( $\omega_1=314$  рад./с) и минимальную  $n_2=100$  об/мин ( $\omega_2=3,69$  рад./с). Из конструктивных соображений ширину маховика принимаем  $h=0,3$  м.

В соответствии с уравнениями (2 - 4) найдем, что наружный радиус маховика R будет

$$R = \left[ \frac{8 \cdot 3600 \cdot \mathcal{E}}{\pi \cdot h \cdot \rho (\omega_1^2 - \omega_2^2)} + r^4 \right]^{1/4}, \quad \text{м} \quad (5)$$

В наименее затратном варианте принимаем простейшую конструкцию стального цилиндрического маховика ( $\rho=7900$  кг/м<sup>3</sup>). При  $r=0,02$  м из (5) при максимальном энергопотреблении  $\mathcal{E}=12,8$  кВтч получим  $R=0,1497$  м.

### Выводы

На момент написания этой статьи провести экспериментальную проверку работоспособности ИНЭ в составе схемы ДНЭП еще не представилось возможным. Однако, учитывая, что массогабаритные и частотные характеристики ИНЭ, определенные в нашей работе, достаточно близки к таковым для ИНЭ, испытанного в работе [10], (без привязки его к конкретной внешней схеме), – это позволяет сделать следующие выводы:

1) Найденные в результате расчетов характеристики ИНЭ применительно к жилому зданию с потребляемой электрической энергией до 5 кВт свидетельствуют о простой реализуемости ИНЭ в составе ДНЭП. При этом использование ИНЭ может быть организовано так, что круглосуточная оплата электрической энергии может производиться по ночному тарифу. 2) Ссылаясь на результаты испытаний ИНЭ в работе [10], можно утверждать, что КПД накопителя должно быть не ниже 96,7 %,



что выше, чем у всех других типов реализованных аккумуляторов. 3) В связи с чисто механической природой аккумулирования энергии и использованием обычной стали для изготовления ИНЭ, его можно считать экологически чистым на всех стадиях жизненного цикла эксплуатации. Особенно это существенно в сравнении с использованием гальванических электроаккумуляторов.

#### Список использованной литературы

1. Сетюков В. Б. Здания с нулевым потреблением энергии извне, как составляющая в перспективе развития возобновляемой энергетики /В. Б. Сетюков // Интегровани технології та енергозбереження. 2014.–№ 2.–С.3–11.
2. Широков Е. И. Экодом нулевого энергопотребления: реальный шаг к устойчивому развитию /Е. И. Широков/ Архитектура и строительство России. – № 2 2009. – С. 35–39.
3. К. Гертис Здания XXI века – здание с нулевым потреблением энергии/ К. Гертис / электронный журнал энергосервисной компании «Экологические системы», – 2012. – № 4.
4. Экодом нулевого энергопотребления. Архитектура и строительство России, Москва//Открытая электронная библиотека по инженерным дисциплинам.
5. Конкуренция в строительстве Equilibrium// Корпорация ипотеки и жилищного строительства Канады (англ.).
6. Net Zero Energy Homes of Future: A Case Study of Eco Terra™ House in Canada//Natural resources of Canada (government site) (англ.).
7. Green Homes. Towards energy- efficient housing in the United Nations Economic commission for Europe region/ 2009// United Nations Economic commission for Europe (англ.).
8. Energy efficiency requirements in building codes, energy efficiency policies for new buildings. Oecd/ IEA, March 2008// International Energy Agency (англ.).
9. Нуждин В. Н. Новая жизнь центрифуги или аккумулирование энергии/ В. Н. Нуждин, А. А. Просвиринов// Атомная стратегия. – 2007, – № 27, – С.3–12.
10. Гулия Н. В. Циклические испытания накопителя кинетической энергии / Н. В. Гулия. А. В. Кацай// «Русский сверхпроводник». – 2012, <http://www.rhsc.ru/>
11. Гулия Н. В. Супермаховики – из суперкарбона./ Изобретатель – рационализатор. – 2005, – № 12 (672). С.10–15.
12. Каданиева А. И. Углеродные волокна /А. И. Каданиева, В. А. Тверской //2008. – М.: МИТХТ им. М. В. Ломоносова. – 55с.
13. Панин В. В. Микроэнергокомплекс на базе влажно – паровой турбины, солнечного коллектора и теплового насоса/ Автореферат дис. канд. техн. наук 2013.
14. Справочник машиностроителя т.1 под ред. М. А. Саверина М.: ГНТИ, 1951. – 1036 с.
15. Биргер И.А. Соппротивление материалов/ И. А. Биргер, Б.Ф. Шорр, Р. М. Шнейдерович// М.: Машгиз. – 1966. – 616 с.

#### References

1. Setiukov V. B., Building with a zero consumption of energy from outside, as a constituent is in the prospect of development of renewable energy [Zdaniya s nulevum potrebleniem energii izvne, kak sostavlyayushaya v perspective razvitiya vozobnovlyаемой energetiki] // Integrated technologies and energy conservation [Integrovani tehnologii ta energozberegennyya] . 2014. – № 2.– P. 3–11.
2. K. Gertis, Buildings of XXI century are building with zero energy consumption/[Zdaniya XXI veka Zdaniya s nylevum potrebleniem energii]/ electronic magazine of energy service company «The Ecological systems»,[Elektronnui gurnal energoservisnoi kompanii «Ekologicheskie sistemu».– 2012. –№ 4.
3. Ekodom of a zero energy consumption. Architecture and building of Russia, Moscow //[Ekodom nulevogo energopotrebleniya. Arhitektura i stroitelstvo Rossii. Moskva]. Open electronic library on engineering disciplines [Otkrutaya elektronnyaya biblioteka po ingenernum disziplnam.
4. Competition in building of Equilibrium [Konkurenziya v stroitelstve Equilibrium] // Corporation of mortgage and housing building of Canada (англ.) [Korporaziya ipoteki i gilishnogo stroitelstva Kanadu.
- 5.Competition in building of Equilibrium [Konkurenziya v stroitelstve Equilibrium] // Corporation of mortgage and housing building of Canada (англ.) [Korporaziya ipoteki i gilishnogo stroitelstva Kanadu.
9. Nuzhdin V.N. New life of centrifuge or accumulation of energy [Novaiya gizm zentrifugi ili akkumulirovanie energii] / V. N. Nuzhdin, A. A. Prosvimov// Atomic strategy. [Atomnaya strategiya] – 2007, – № 27, – P. 3–12.
- 10.Gulia N.V. The Cyclic tests of store of kinetic energy [Ziclicheskie isputaniya nakopitelya kineticheskoi energii] /N.V. Guliya. A.V. Kacay// the «Russian superconductor»[Russkii sverhprovodnik] . – 2012, <http://www.rhsc.ru/>
- 11.Gulia N. V. Superfly-wheels – from a supercarbon. [Supermahoviki iz superkarbona]/ An inventor is a rationalizer. [Izobretatel - razionatel] – 2005, – № 12 (672). – P. 10–15.
- 12.Kadanieva A. I. The Carbon fibres [Uglerodnue volokna] /А. I. Kadanieva , V. A. Tverskoy //2008. – М.: МИТХТ the name of M.V. Lomonosov. – 55 p.
13. Panin V. V. Lenkroenergokompleks on the base of moist – steam-turbine, sun collector and thermal pump/ [Lenkroenergokompleks na baze vlagno – parovoi turbine, solnechnogo collectora, teplovogo nasosa] Abstract of thesis of candidate of technical Sciences 2013.
- 14.Reference book of machine builder of 0.1 under edition. M.A. Saverina M.: GNTI, 1951. – 1036 p.
- 15.Birger I.A. Resistance of materials/ I.A. Birger, B.F. Shorr, R.M. Shneyderovich// М.: Mashgiz. – 1966. – 616 p.

Поступила в редакцию 17.07 2014 г.